تعیین مقدار فلاکس اکسیدی بهینه در جوشکاری A-TIG فولاد HSLA-100[1]★

نصرت اله ابدالی[(۱)]   علیرضا ابراهیمی[(۲)]

چکیده

فولاد HSLA–۱۰۰ فولادی نسبتاً جدید است که به دلیل استحکام بالا و چقرمگی دما پایین، کاربرد های فراوانی در محیط های دریایی دارد. در این مطالعه اثر میزان فلاکس های اکسیدی بر هندسه جوش، ولتاژ قوس و ریزسختی مناطق مختلف جوش ورق فولادی HSLA–۱۰۰ با ضخامت ۵/٤ میلیمتر مورد برر سی قرار گرفت. در ابتدا فلاکس های اک سیدی $SiO_۲$ و $TiO_۲$ در محدوده چگالی سطحی بین ۰–۵۵ mg/cm[۲] بر سطح ات صال اعمال شدند و سپس فرایند جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی به صورت گرده بر روی ورق انجام شد. جهت بررسی امکان صنعتی شدن روش جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی به همراه فلاکس فعال کننده سطحی و همچنین جهت اعمال یکنواخت پوشش، فلاکس ها با استفاده از روش اسپری بر سطح اتصال اعمال شدند. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که با افزایش چگالی سطحی فلاکس‌های $SiO_۲$ و $TiO_۲$، نسبت عمق به پهنا ابتدا به سرعت افزایش و سپس به مقداری ثابت ر سید که این مقادیر به ترتیب برابر ۱/۱٤ و ۰/۵۱ می با شد. شرایط بهینه چگالی سطحی مربوط به فلاکس $SiO_۲$ در محدوده ۵/۵–۱۰ mg/cm[۲] بدست آمد که بیشترین مقدار عمق نفوذ در این شرایط برابر ٦/١٨ میلیمتر می‌باشد. همچنین در هنگام افزایش چگالی سطحی فلاکس $SiO_۲$ ولتاژ جوشکاری نیز از مقدار ۱۳ ولت در حالت بدون فلاکس به ١٦/٦ ولت افزایش یافت که به دنبال آن حرارت ورودی افزایش و سختی حاصل مقداری کاهش یافت. در مقابل در هنگام استفاده از فلاکس $TiO_۲$ ولتاژ قوس مقداری کاهش یافت و تغییر محسوسی دیده نشد.

واژه‌های کلیدی جوشکاری A-TIG، فلاکس های اکسیدی و فولاد HSLA–۱۰۰

Determining the Optimal Amount of Oxide Flux in A-TIG Welding of HSLA-100 Steel

N. Abdali   A. R. Ebrahimi

Abstract

The HSLA-100 steel is a newcomer steel produced by USA navy that have many applications in the marine environment structures due to its high strength and toughness. In present study the effect of SiO_2 and TiO_2 fluxes content on weld geometry, arc voltage and micro hardness of weld different regions of HSLA-100 steel with 5.4 mm were studied. At first oxide fluxes SiO_2 and TiO_2 with surface density in the range of 0-55 mg/cm^2 was applied on joint, then bead on plate TIG welds are carried out. Due to determine the feasibility of industrialization and applying a uniform coating, fluxes were applied to the connection by spraying method. The results showed that depth to width ratio for SiO_2 and TiO_2 fluxes initially increases sharply with surface flux density increase and subsequently becoming approximately constant (1.14 and 0.51 were obtained respectively). Maximum penetration depth of 6.18 mm for A-TIG is obtained for SiO_2 flux in surface flux density range 5.5 to 10 mg/cm^2. Also, by increase of SiO_2 surface flux density sharp arc voltage increase was observed from 13 to 16.6 V that causes heat input increase and subsequently hardness decrease. When using TiO_2 flux arc voltage value fell, there was no significant change.

Keywords Oxide surface flux density, Activated TIG welding, HSLA-100 steel

★ نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹۵/۱۲/۸ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹۷/٦/١٧ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی (گرایش جوشکاری) دانشگاه صنعتی سهند.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Email: arebrahimi@aut.ac.ir

DOI: 10.22067/ma.v30i2.62331

مقدمه

نیاز روز افزون به مواد با عملکرد مطلوب برای استفاده در کاربردهای ساختمانی و نظامی منجر به توسعه چندین دسته از فولادهای آلیاژی، به طور ویژه فولادهای نوع کم آلیاژ استحکام بالا (HSLA) شد [1]. استحکام بالا و چقرمگی دما پایین فولاد کم آلیاژی HSLA–۱۰۰ سبب گردیده است این نوع فولاد به عنوان جایگزینی برای فولاد HY–۱۰۰ در کاربردهای دریایی و ساختمانی مورد استفاده قرار بگیرد. همچنین به دلیل پایین بودن میزان کربن فولاد HSLA–۱۰۰، این فولاد از جوش‌پذیری بهتری نسبت به فولاد HY–۱۰۰ برخوردار است که به تبع آن هزینه ساخت با استفاده از این فولاد را به دلیل عدم نیاز به پیش‌گرم کردن کاهش می‌یابد [2,3].

فرایند جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی (TIG) روشی بسیار مناسب برای جوشکاری فلزات و آلیاژهای بیشمار مانند فولادهای زنگ نزن، آلومینیم، منیزیم، مس و مواد واکنش‌پذیری نظیر تیتانیم و تانتالیم می‌باشد. همچنین فرایند جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی اتصالی به خوبی فلز پایه از لحاظ ترکیب، استحکام و خواص سرویس ایجاد می‌کند. بهمین دلیل این فرایند برای جوشکاری ورق، صفحه و لوله در صنایع هسته‌ای، هوافضا، تولید قدرت، کشتی سازی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد [4,5]. محدویت اصلی جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی راندمان پایین آن است که از نرخ رسوب و عمق نفوذ کم این روش ناشی می‌شود. بنابراین با این روش صفحات با ضخامت کمتر از ۳ میلیمتر را جوشکاری می‌کنند [6,7]. برای حل این مشکل اخیرا یک نوع جدید فرایند جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی به همراه فلاکس فعال کننده سطحی (A-TIG) توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. این فرایند توسط موسسه جوشکاری الکتریکی پاتون اوکراین در سال ۱۹۶۰ به منظور جوشکاری تیتانیم ابداع شد [8-10]. در این روش یک لایه نازک از فلاکس‌های اکسیدی، هالیدی (فلوریدی و هالیدی) و سولفیدی بر سطح فلز پایه اعمال می‌شود. بدین طریق که قبل از جوشکاری فلاکس مخلوط شده با استون به شکل سوسپانسیون در آمده و بر سطح قطعه کار اعمال می‌شود و سپس فرایند جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی بر روی آن اجرا می‌شود. نتایج مطالعات انجام شده در این زمینه بیانگر این امر است که با استفاده از این روش می‌توان صفحات فولادی و فولاد زنگ نزن تا ضخامت ۱۰تا ۱۲ میلیمتر را در یک پاس و بدون آماده سازی لبه جوشکاری کرد. به عبارت دیگر با استفاده از این روش افزایش ۳۰۰٪ در عمق نفوذ جوش نسبت به جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی مرسوم ایجاد می‌شود. بنابراین در پروسه‌ای که از فرایند جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی به همراه فلاکس فعال کننده سطحی استفاده می‌شود می‌توان قطعات ضخیم را با سرعت بیشتری جوشکاری کرد که به دنبال آن هزینه‌های حاصل از جوشکاری به کمتر از نصف کاهش می‌یابد [5,11-14]. فلاکس فعال کننده بر اساس دو مکانیزم باعث افزایش عمق نفوذ جوش می‌شوند، یکی بر اساس نیروی مارانگونی معکوس [15-17]و دیگری با اساس رفتار قوس جوشکاری [18-20]. در نظریه اول عناصر فعال سطحی در حوضچه مذاب باعث تغییر ضریب حرارتی کشش سطحی از منفی به مثبت می‌شود. بنابراین جهت جریان مارانگونی از برون سو به درون سو تغییر کرده و باعث افزایش عمق نفوذ می‌شود. در نظریه بعدی؛ تمرکز و انقباض قوس در حضور عناصر فعال باعث افزایش عمق نفوذ می‌شود. نتایج حاصل از آزمایشات سندر و همکارانش [21] در زمینه فلاکس‌های اکسیدی نشان داد که بیشترین تغییر در بین داده‌های بدست آمده برای جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی و جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی به همراه فلاکس فعال کننده سطحی ، مربوط به میزان اکسیژن فلز جوش است. در نتیجه اکسیژن حل شده در جوش به عنوان دلیل اصلی در افزایش عمق نفوذ بیان شد. از آنجاییکه جابجایی مارانگونی معکوس در حضور اکسیژن تغییر جهت می‌دهد، بنابراین آن‌ها بر آن شدند که یک رابطه بین چگالی سطحی فلاکس و جابجایی مارانگونی معکوس

پیدا کنند. آن‌ها در محاسبات خود به این نتیجه رسیدند، برای اینکه جابجایی مارانگونی معکوس ایجاد شود حداقلی از چگالی سطحی فلاکس لازم است. به دلیل کاربرد فراوان فولاد HSLA-۱۰۰ در صنایع مختلف و نبودن اطلاعاتی در مورد جوش با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی به همراه فلاکس فعال کننده سطحی این فولاد، بررسی تاثیر فلاکس ها بر روی جوش حاصله ضروری می‌باشد. در این مطالعه تاثیر میزان فلاکس‌های SiO_2 و TiO_2 بر روی هندسه جوش، ولتاژقوس و میکروسختی مناطق مختلف جوش ورق فولادی HSLA-۱۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از ورق فولادی HSLA-۱۰۰ با ضخامت ۵/٤ میلیمتر استفاده شد که ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آن در جدول (۱) آورده شده است. به منظور انجام جوشکاری، ورق‌هایی در ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت. از فرایند جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی برای جوشکاری ورق‌های فولاد HSLA-۱۰۰ استفاده شد. جوشکاری به صورت اتوماتیک و بر روی میز متحرک با قابلیت تنظیم سرعت حرکت انجام شد. در این مطالعه از یک الکترود تنگستنی با ۲٪ توریم (ThO_2) به قطر ۳/۲ میلیمتر و زاویه نوک ٦۰ درجه استفاده شد. از قطبیت جریان مستقیم با الکترود منفی (DCEN) استفاده شد. به منظور انجام جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی از گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ با شارش ۱۰ لیتر بر دقیقه استفاده گردید. سایر شرایط جوشکاری مورد استفاده در جدول (۲) آورده شده است.

در ابتدا به منظور دستیابی به جوش باکیفیت بهتر و همچنین جهت حذف ناخالصی‌های سطحی، ابتدا نمونه‌ها با کاغذ سمباده از جنس کاربید سیلیسیم با مش ٤۰۰ سمباده زنی شده و سپس توسط استون تمیز شدند. در این مطالعه به منظور بررسی اثر میزان فلاکس بر عمق نفوذ و نسبت عمق به پهنا، چگالی‌های سطحی بین ۰-۵۵ mg/cm^2 برای دو نوع فلاکس SiO_2 و TiO_2 مورد استفاده قرار گرفت. بدین طریق که ابتدا این فلاکس‌ها توسط مخلوط کردن در یک مایع با درجه تبخیر متوسط مانند استون به شکل سوسپانسیون درآمده (۸ گرم پودر در ۲۰۰ میلی لیتر استون) و بر روی سطح اتصال اعمال شدند. برای اعمال دقیق مقدار پودر، از روش اسپری کردن فلاکس استفاده شد که مشخصه مهم آن یکنواختی پوشش ایجادی است. به علت ضخامت پایین ورق فولادی مورد استفاده، در تمامی آزمایش‌ها از جریان جوشکاری A ۱۵۰ استفاده شد.

برای بررسی عمق نفوذ و نسبت عمق به پهنای جوش-ها، از نمونه‌های جوشکاری شده مقاطع عرضی تهیه گردید. برای تهیه نمونه‌ها از اره نواری و کاتر استفاده شد تا حرارت وارد شده به نمونه مورد آزمایش کمترین باشد. سپس این نمونه‌ها تا مش ۱۲۰۰ سمباده زنی شده و در محلول ٤٪ نیتال به مدت ۱۰ ثانیه حکاکی (ماکرو اچ) شدند. مطالعه مقاطع به صورت چشمی و با میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ×۵۰ انجام شد. سپس از مقاطع جوش عکس تهیه گردید. ولتاژ قوس جوش‌های ایجاد شده با و بدون فلاکس فعال کننده سطحی توسط دستگاه ولتمتر اندازه‌گیری شد. برای اینکار ولتمتر به دو قطب دستگاه جوشکاری متصل گردید و مقدار ولتاژ حین جوشکاری توسط دوربین ثبت و ضبط شد. همچنین جهت بررسی هندسه قوس از دوربین فیلم برداری با بزرگنمایی مناسب استفاده شد. جهت انجام آزمون ریزسختی ابتدا نمونه‌ها تا مش ۱۲۰۰ سمباده زنی شدند تا صافی سطح مطلوب حاصل شود و سپس این آزمون با اعمال بار ۱۰۰ گرمی به مدت ۱۵ ثانیه توسط دستگاه ریزسختی سنجی مدل LECO-M٤۰۰-G۱ ساخت شرکت LECO انجام شد.). تمامی داده‌های موجود در منحنی های حاصل میانگین سه بار آزمایش می‌باشد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد HSLA–۱۰۰

عنصر	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Ti	V	N	استحکام تسلیم	استحکام کششی	ازدیاد طول
درصد وزنی	۰/۰٦۱	۰/۲۷	۰/۸۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸	۰/۷۱	۰/۷۱	۳/۳۵	۱/۷	۰/۰٤٤	۰/۰۱۵	۰/۰۱٤	۰/۰۱۳	۷۰۷	۸۵۹	۲۲

جدول ۲ شرایط و پارامترهای جوشکاری

الکترود	
نوع	W–٪۲ ThO_2
قطر	۳/۲ (mm)
زاویه نوک الکترود	٦۰°
قطبیت	DCEN
گاز محافظ	
نوع	آرگون خالص
شارش	۱۰ (L/min)
جریان جوشکاری	۱۵۰ (A)
سرعت جوشکاری	۲ (mm/s)
طول قوس	۳ (mm)

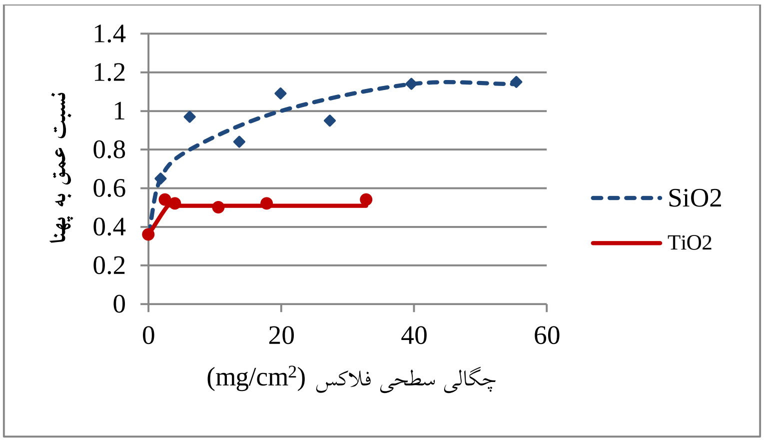
نتایج و بحث

تاثیر میزان فلاکس بر هندسه جوش

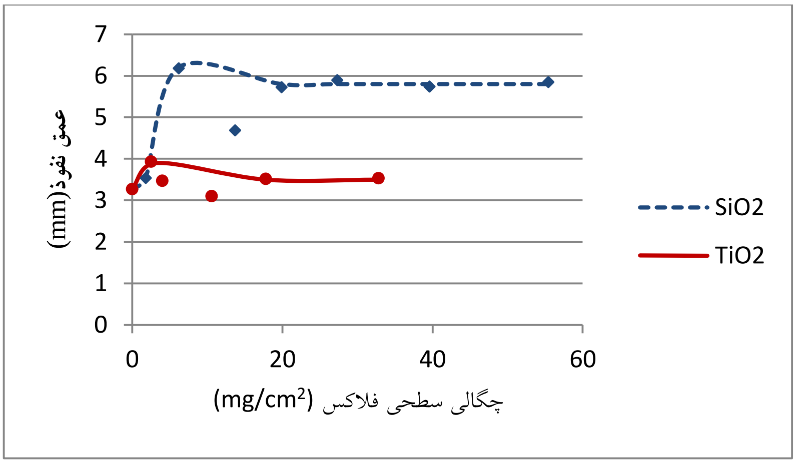
منحنی تغییرات نسبت عمق به پهنا با چگالی سطحی برای این دو فلاکس در شکل (۱) رسم شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود نسبت عمق به پهنای جوش برای هر دو فلاکس با افزایش چگالی سطحی فلاکس ابتدا به سرعت افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر میزان فلاکس به یک مقدار ثابت رسیده است. نسبت عمق به پهنای جوش در جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی مرسوم مطابق با چگالی سطحی فلاکس صفر، برابر ۰/۳٦ می‌باشد که با افزایش میزان فلاکس برای فلاکس SiO_2 و TiO_2 به ترتیب به مقادیر ثابت ۱/۱٤ و ۰/۵۱ افزایش یافته است. بدین ترتیب می‌توان با استفاده از فلاکس SiO_2 با چگالی سطحی ۳۹/٦ mg/cm^2 به بالاتر از ۲۲۰٪ افزایش در نسبت عمق به پهنا جوش دست یافت. به عبارت دیگر در هنگام استفاده از فلاکس SiO_2 با چگالی معین، نسبت عمق به پهنا در مقایسه با جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی مرسوم به بیش از سه برابر افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل (۲) که منحنی تغییرات عمق نفوذ با میزان فلاکس می‌باشد؛ مقدار پودر بهینه برای دست یابی به بیشینه عمق نفوذ برای فلاکس SiO_2 در محدوده mg/cm^2 ۱۰–۵/۵ بدست آمد که بیشینه عمق نفوذ برابر ٦/۱۸ میلیمتر می‌باشد (شکل ۳). دلیل افزایش عمق نفوذ و نسبت عمق به پهنای جوش‌های ایجاد شده با فلاکس‌های SiO_2 و TiO_2 را می‌توان به تجزیه این اکسیدها زیر حرارت قوس مرتبط دانست.

با افزایش میزان فلاکس اکسیدی برای جوشکاری، میزان اکسیژن حل شده در فلز جوش نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه با افزایش دما و میزان اکسیژن، مقدار گرادیان کشش سطحی $\frac{\partial\sigma}{\partial T}$ افزایش می‌یابد و در یک محدوده مناسبی از میزان اکسیژن، از منفی به مثبت تغییر کرده و به دنبال آن جریان درون سو تقویت شده و باعث ایجاد جوش عمیق و باریک می‌شود [17]. از طرف دیگر، هنگامی که مقدار فلاکس خیلی زیاد باشد فلاکس زیر قوس به طور کامل تجزیه نمی‌شود و

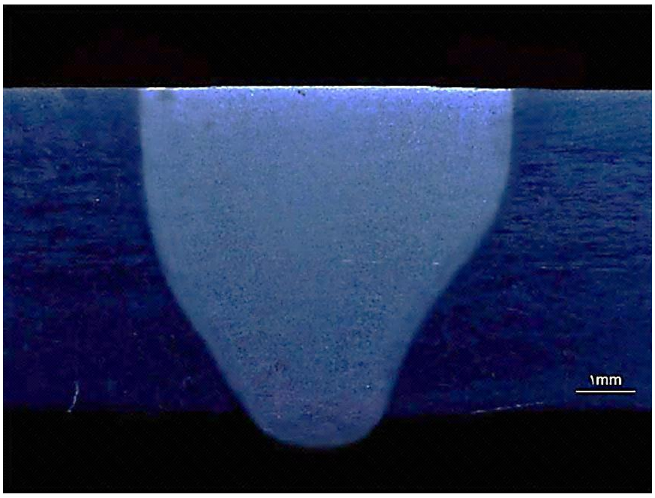
برخی ذرات اکسیدی جامد در سطح حوضچه مذاب شناور شده و در لبه حوضچه و یا مرکز آن تجمع می‌یابند. این ذرات اکسیدی جامد در حوضچه مذاب مانع جریان سیال شده و به طور چشم‌گیری از سرعت حرکت سیال می‌کاهند. بنابراین میزان بیش از حد فلاکس با جلوگیری از جریان یافتن مذاب در حوضچه جوش، جلوی افزایش نسبت عمق به پهنا را می‌گیرند [22]. در اثر برهم کنش بین جابجایی مارانگونی معکوس ایجاد شده توسط افزایش اکسیژن و ذرات اکسیدی جامدی که مانع حرکت سیال در حوضچه می‌شوند نسبت عمق به پهنا با افزایش بیشتر فلاکس به یک مقدار ثابت می‌رسد. با توجه به شکل (٤)، با افزایش چگالی سطحی فلاکس همچنان شاهد کاهش پهنای جوش می‌باشیم. این مطلب بیانگر این است که در سرتاسر این محدوده چگالی، نیروی مارانگونی معکوس شده است. همچنین با توجه به شکل (۱) می‌توان نتیجه گرفت که از شدت نیروی مارانگونی معکوس شده، کاسته نشده است و میزان اکسیژن حل شده درون فلز جوش در محدوده ذکر شده در تئوری لو و همکاران قرار دارد. همچنین فلاکس SiO_2 نسبت عمق به پهنا را به طور چشم‌گیری بیشتر از فلاکس TiO_2 افزایش داده است. دلیل آن نیز به ترمودینامیک اکسیدها مربوط می‌شود که اکسید سیلیسیم ناپایدارتر از اکسید تیتانیم است و به راحتی زیر حرارت قوس به اکسیژن تجزیه می‌شود و اکسیژن فلز جوش را افزایش می‌دهد [37,42,43].



شکل ۱ تغییرات نسبت عمق به پهنا با چگالی سطحی فلاکس

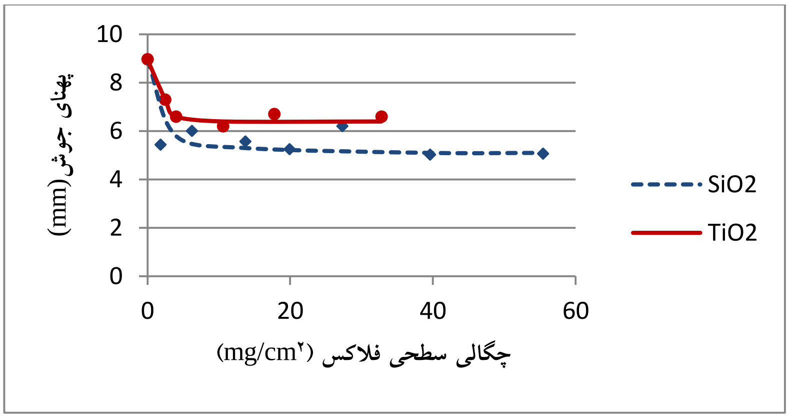


شکل ۲ تغییرات عمق جوش با چگالی سطحی فلاکس



D= ۶/۱۸ , W= ۶/۰۲ , D/W= ۰/۹۷

شکل ۳ سطح مقطع جوش با فلاکس SiO_2 با چگالی سطحی ٦/٢ mg/cm^2



شکل ٤ تغییرات عرض جوش با چگالی سطحی فلاکس

تاثیر میزان فلاکس بر ولتاژ قوس

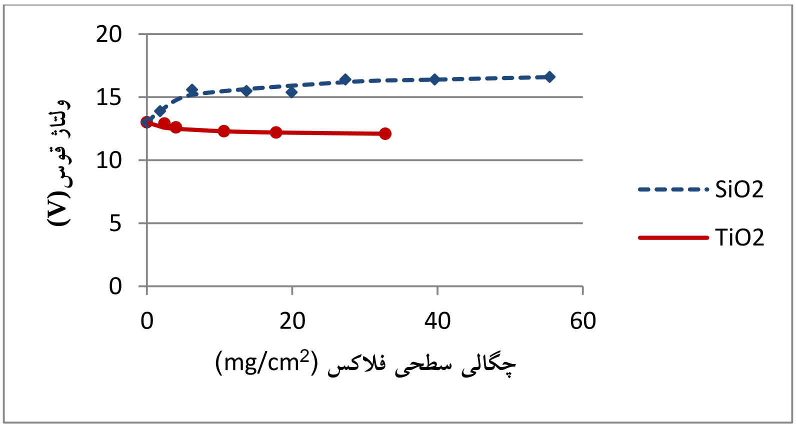
در جهت بررسی تاثیر میزان فلاکس های اکسیدی SiO_2 و TiO_2 بر روی ولتاژ قوس، فرایند جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی در شرایط یکسان (جریان جوشکاری، سرعت حرکت، طول قوس، شارش گاز و شکل الکترود ثابت است) با تغییر میزان فلاکس بر روی ورق فولادی HSLA-۱۰۰ انجام شد. شکل (۵) منحنی تغییرات ولتاژ قوس را با چگالی سطحی فلاکس برای پودرهای SiO_2 و TiO_2 نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود با افزایش چگالی سطحی فلاکس SiO_2، ولتاژ قوس ابتدا با شیب بیشتر و سپس با شیب کمتری افزایش می‌یابد. ولتاژ قوس در حالت جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی معمول برابر ۱۳ ولت می‌باشد که با افزایش فلاکس SiO_2 به ١٦/٦ ولت رسیده است. اما در حضور فلاکس TiO_2 و با افزایش فلاکس ولتاژ قوس مقداری کاهش یافته و به میزان ۱۲ ولت رسیده است. همانطور که از شکل (٦-ب) مشاهده می‌شود در هنگام جوشکاری با فلاکس SiO_2 یک کشیدگی قوس به سمت عقب الکترود دیده شد این در حالیست که هنگام استفاده از فلاکس TiO_2 چنین پدیده ای رخ نداد (٦-ه). اکسید سیلیسیم یک اکسید غیر فلزی است که مقاومت ویژه الکتریکی آن بیشتر از اکسید تیتانیم است. بنابراین شکل گیری کانال رسانا بین الکترود تنگستنی و قطعه کار فقط در نقاطی که فلاکس ذوب و یا تبخیر شده باشد برقرار می‌شود. از آنجاییکه پوشش SiO_2 پشت قوس

جوشکاری ذوب و یا تبخیر می‌شود، قوس در اثر ایجاد کانال رسانا به عقب کشیده می‌شود. در نتیجه طول موثر قوس و ولتاژ قوس افزایش می‌یابد. همانطور که از شکل (٦-الف تا د) مشاهده می‌شود با افزایش فلاکس SiO_2 کشیدگی قوس به سمت عقب الکترود بیشتر می‌شود. هنگامی که چگالی سطحی فلاکس افزایش می‌یابد برقراری قوس الکتریکی توسط فلاکس ذوب نشده ممانعت می‌شود و انرژی حرارتی بیشتری برای غلبه بر سد ضخامت فلاکس مورد نیاز است. در نتیجه قوس جوشکاری بیشتر به سمت عقب الکترود کشیده می‌شود [9] و طول قوس نیز بیشتر می‌شود. اما اکسید تیتانیم یک اکسید فلزی است که هادی جریان می‌باشد بنابراین کانال رسانا بین الکترود و قطعه کار به راحتی برقرار می‌شود. با افزایش چگالی سطحی فلاکس TiO_2 ضخامت فلاکس افزایش و طول قوس کاهش می‌یابد بنابراین پدیده کاهش ولتاژ در هنگام افزایش فلاکس TiO_2 را می‌توان به ضخامت فلاکس مربوط دانست.

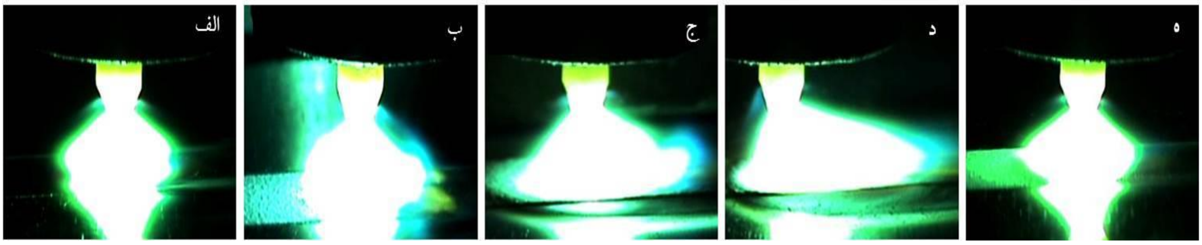
تاثیر میزان فلاکس بر ریزسختی و ریزساختار

در شکل (۷) نتایج حاصل از آزمون ریزسختی سنجی نمونه‌های جوش داده شده بدون و با استفاده از فلاکس ارائه شده ا ست. همانطور که از شکل م شخص ا ست سختی جوش برای نمونه جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی با فلاکس SiO_2 در همه نواحی جوش کمتر از دو نمونه دیگر می‌با شد. دلیل این تفاوت را می‌توان به افزایش حرارت ورودی متناسب با افزایش ولتاژ قوس در نمونه با فلاکس SiO_2 مربوط دانست. بدین معنی که با افزایش حرارت ورودی سرعت سرمایش کم شده و ریزساختار به سمت ایجاد فازهای نرمتر سوق می‌یابد. متوسط سختی بدست آمده برای نمونه های جوش بدون و با استفاده از فلاکس TiO_2 و SiO_2 در فلز جوش به ترتیب برابر ۳۰۵، ۳۰۹ و ۲۸۵ ویکرز و در منطقه متاثر از حرارت درشت دانه ۳٤۰، ۳۲۵ و ۳۲۵ ویکرز می‌باشد. همچنین سختی اندازه‌گیری شده برای فلز پایه تقریبا ۳۰۰ ویکرز بدست آمده است.

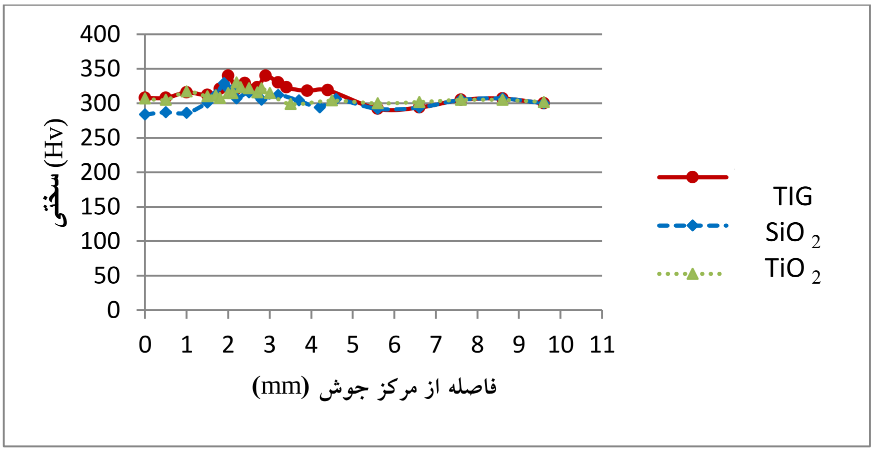
ریزساختار فلز پایه دانه ریز و شامل مخلوطی از مارتنزیت کوئنچ-تمپر، بینیت دانه‌ای و فریت چند وجهی می‌باشد. شکل (۸) تصاویر میکروسکوپ نوری منطقه متاثر از حرارت درشت دانه نمونه با فلاکس SiO_2 با بیشترین حرارت ورودی و بدون فلاکس را نشان می دهد. اندازه دانه‌های آستنیت اولیه در نمونه با فلاکس SiO_2 بزرگتر از نمونه بدون فلاکس است. دلیل این اختلاف در اندازه دانه آستنیت اولیه، به افزایش حرارت ورودی در اثر اضافه کردن فلاکس، مربوط می شود. با افزایش اندازه دانه های آ ستنیت اولیه مقدار مرزدانه‌ها که مکان‌های مناسب برای جوانه زنی فریت می‌باشد کاهش می یابد بنابراین کسر حجمی فاز سخت تر (مارتنزیت) بیشتر می شود و به دنبال آن سختی افزایش می یابد.



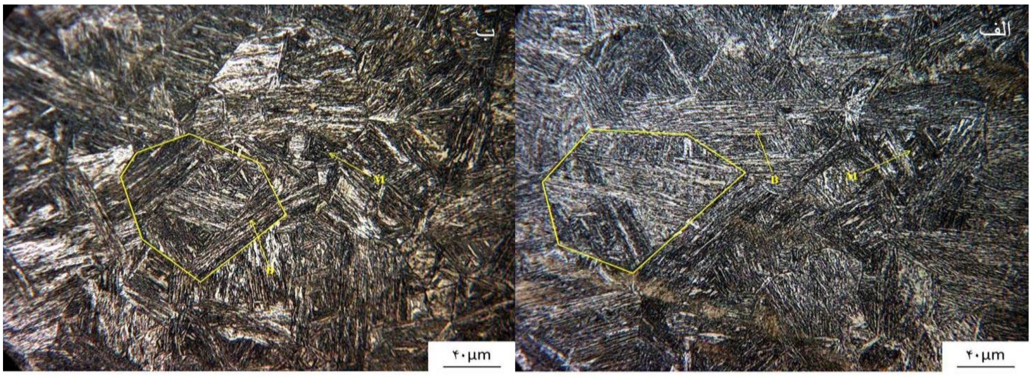
شکل ٥ تغییرات ولتاژ قوس با چگالی سطحی فلاکس



شکل ٦ نمای جانبی قوس در جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی و جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی به همراه فلاکس فعال کننده سطحی ، (الف) با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی مرسوم، (ب) SiO_2 با چگالی ۱/۸، (ج) با چگالی ٦/۲، (د) با چگالی ۲۷/۳ و (ه) TiO_2 با چگالی ۲/۵ mg/cm^2



شکل ۷ تغییرات سختی در مناطق مختلف جوش



شکل ۸ تصاویر ریز ساختار منطقه متاثر از حرارت درشت دانه جوش (الف) با فلاکس SiO_2 و (ب) بدون فلاکس

نتیجه‌گیری

در این مطالعه جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی به همراه فلاکس فعال کننده سطحی فولاد ۱۰۰-HSLA مورد بررسی قرار گرفت. پودر های اکسیدی SiO_2 و TiO_2 به عنوان فلاکس های اکسیدی فعال کننده سطحی استفاده شد تا تاثیر آنه بر روی هندسه جوش، ولتاژ قوس و خواص مکانیکی بررسی شود. نتایج اصلی به شرح زیر می باشد:

۱. چگالی سطحی فلاکس ها به عنوان اصلی ترین پارامتر در جوشکاری با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی به همراه فلاکس فعال کننده سطحی می باشد. نسبت عمق به پهنای جوش برای هر دو فلاکس با

افزایش میزان چگالی سطحی ابتدا به سرعت افزایش و سپس به یک مقدار ثابت رسید. با استفاده از فلاکس SiO_2 نسبت عمق به پهنا در مقایسه با حالت بدون فلاکس ۲۲۰٪ افزایش یافت که در نتیجه راندمان بهبود می یابد.

۲. بیشترین مقدار عمق نفوذ در حالت با استفاده از فلاکس SiO_2 با چگالی سطحی بین mg/cm^2 ۱۰-۵/۵ و برابر ۶/۱۸ میلیمتر می باشد.

۳. ولتاژ قوس با افزایش چگالی سطحی فلاکس SiO_2 ابتدا به سرعت افزایش و سپس شیب افزایش کاهش یافت که این مقدار برای فلاکس SiO_2 از ۱۳ به ۱۶/۶ ولت رسید. در حالیکه در هنگام استفاده از فلاکس TiO_2 این عدد به ۱۲ ولت کاهش یافت.

٤. در جوش استفاده شده از فلاکس SiO_2 میزان ریزسختی در تمام مناطق جوش کمتر از حالت بدون فلاکس است. دلیل این اختلاف مربوط به افزایش حرارت ورودی در اثر افزایش ولتاژ قوس می باشد.

مراجع

1. Stoudt M., Ricker R., "Characterization of the hydrogen induced cold cracking susceptibility at simulated weld zones in HSLA-100 steel", DTIC Document, (1994).
2. Shome M., Mohanty O., "Continuous cooling transformation diagrams applicable to the heat-affected zone of HSLA-80 and HSLA-100 steels", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 37, pp. 2159-2169, (2006).
3. Dhua S., Mukerjee D., Sarma D., "Effect of cooling rate on the As-quenched microstructure and mechanical properties of HSLA-100 steel plates", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 34, pp. 2493-2504, (2003).
4. Tseng K.H., "Development and application of oxide-based flux powder for tungsten inert gas welding of austenitic stainless steels", *Powder Technology*, Vol. 233, pp. 72-79, (2012).
5. Maduraimuthu V., Vasudevan M., Muthupandi V., Bhaduri A., Jayakumar T., "Effect of Activated Flux on the Microstructure, Mechanical Properties, and Residual Stresses of Modified 9Cr-1Mo Steel Weld Joints", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 43, pp. 123-132, (2012).
6. Chern T.S., Tseng K.H., Tsai H.L., "Study of the characteristics of duplex stainless steel activated tungsten inert gas welds", Materials Design, Vol. 32, pp. 255-263, (2011).
7. Tseng K.H., Chuang K.J., "Application of iron-based powders in tungsten inert gas welding for 17Cr–10Ni–2Mo alloys", *Powder Technology*, Vol. 228, pp. 36-46, (2012).
8. Modenesi P.J., Apolinário E.R., Pereira I.M., "TIG welding with single-component fluxes", *Journal of Materials Processes and Technology*, Vol. 99, pp. 260-265, (2000).
9. Tseng K.H., Chen K.L., "Comparisons Between TiO_2 and SiO_2 Flux Assisted TIG Welding Processes", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 12, pp. 6359–6367, (2012).
10. Zhao Y., Shi Y., Lei Y., "The study of surface-active element oxygen on flow patterns and penetration in A-TIG welding", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 37, pp. 485-493, (2006).

11. Rückert G., Huneau B., Marya S., "Optimizing the design of silica coating for productivity gains during the TIG welding of 304L stainless steel", *Materials Design*, Vol. 28, pp. 2387-2393, (2007).
12. Lu S., Fujii H., Nogi K., "Marangoni convection and gas tungsten arc weld shapevariations on pure iron plates", *ISIJ International*, Vol. 46, pp. 276-280, (2006).
13. Leconte S., Paillard P., Chapelle P., Henrion G., Saindrenan J., "Effects of flux containing fluorides on TIG welding process", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 12, pp. 120-126, (2007).
14. Arunkumar V., Vasudevan M., Maduraimuthu V., Muthupandi V., "Effect of Activated Flux on the Microstructure and Mechanical Properties of 9Cr-1Mo Steel Weld Joint", *Materials Manufacturing Processes*, Vol. 27, pp. 1171-1177, (2012).
15. Heiple C.R., Roper J.R., Stagner R.T., Aden R.J., "Surface active element effects on the shape of GTA, laser and electron beam welds", *Welding Journal*, Vol. 62, pp. 72-77, (1983).
16. Tanaka M., Shimizu T., Terasaki T., Ushio M., Koshiishi F., Yang C.L., "Effects of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 5, pp. 397-402, (2000).
17. Shanping L., Hidetoshi F., Manabu T., Kiyoshi N., "Oxide flux quantity and size effects on the penetration depth in A-TIG welding", *Transactions of JWRI*, Vol. 31, pp. 187-192. (2002).
18. Dong C., Zhu Y., Chai G., Zhang H., Katayama S., "Preliminary Study on the Mechanism of Arc Welding with the Activating Flux", *Aerospace Manufacturing Technology*, pp. 271-278, (2004).
19. Howse D., Lucas W., "Investigation into arc constriction by active fluxes for tungsten inert gas welding", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 5, pp. 189-193, (2000).
20. Lowke J., Tanaka M., Ushio M., "Mechanisms giving increased weld depthdue to a flux", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 38, pp. 3438-3445, (2005).
21. Sándor T., Mekler C., Dobránszky J., Kaptay G., "An Improved Theoretical Model for A-TIG Welding Based on Surface Phase Transition and Reversed Marangoni Flow", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 44, pp. 351-361, (2013).
22. Xu Y.L., Dong Z.B., Wei Y.H., Yang C.L., "Marangoni convection and weld shape variation in A-TIG welding process", *Theoretical Applications of Fracture Mechanic*s, Vol. 48, pp. 178-186, (2007).